

複断面開水路接合部の乱流構造

Turbulent Structure in the Junction Region of Compound Open Channels

群馬大学工学部 正 員 富永 晃宏 Akihiro Tominaga

群馬大学工学部 正 員 江崎 一博 Kazuhiro Ezaki

群馬大学大学院 学生員 森上 秀樹 Hideki Morikami

An investigation on three-dimensional turbulent structure including secondary currents in compound open-channel flow is very important in basic hydraulics as well as practical engineering to verify the friction law of flow and sediment transport. In this study, secondary currents and three-dimensional turbulent structures in compound open channels were revealed experimentally by making use of a fiber-optic laser Doppler anemometer. Strong inclined upflow which is associated with a pair of longitudinal vortices is generated in a junction region between a main channel and a flood plain. Primary mean-flow field and turbulent structure are affected by the secondary currents.

Keywords: Compound open-channel flow, Secondary currents, Turbulent structure

1. まえがき

複断面開水路の流れは、低水路と高水敷の流速差によって発生する高いせん断層によって特徴付けられる。このせん断層には、鉛直軸をもつ渦だけでなく流下方向の軸を持つ、いわゆる二次流が存在する。この複断面接合部近傍の運動機構を解明することが、河川工学上重要な抵抗則や流砂輸送問題を予測する上で必要とされる。近年、複断面開水路の流速分布や壁面せん断応力さらには乱流特性を取り扱った実験的研究が数多く行われている^{1), 2), 3)}。また、水深平均された流れの横断方向の分布特性を記述する2次元解析が行われている⁴⁾。しかし、横断方向の運動量輸送に果たす二次流の効果はほとんど考慮されていない。一方では、乱流の数値計算法が発達し、三次元の乱流モデルを用いた複断面形水路流の計算が行われ、二次流を含めた三次元の乱流構造が計算されるようになってきた^{5), 6)}。このような複断面開水路の運動量や、熱・質量の輸送現象を予測する計算方法の発展のためにも、詳細な乱流特性の実験データが必要とされてきている。

著者らは、最近X型ホットフィルム流速計を用いて複断面開水路流の計測を行った^{7), 8)}。本研究は、より高精度のファイバーレーザードップラー流速計(F LDA)を用いて、より正確で詳細な計測を行い、複断面開水路の乱流構造と、二次流構造を明らかにしたものである。

2. 実験装置および方法

実験は長さ12.5m、幅40cmの勾配可変型開水路で行われた。レーザー流速計を用いるため、非対称な複断面とし、水路の片側に厚さ2cm、幅20cmの塩ビ板を積み重ねて水路全長にわたって設置した。

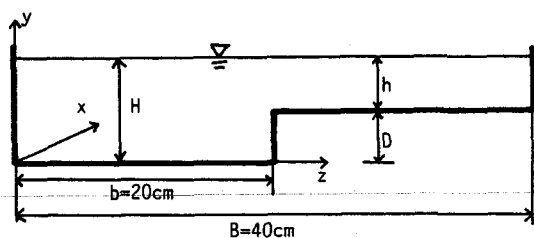


図1 複断面水路断面図

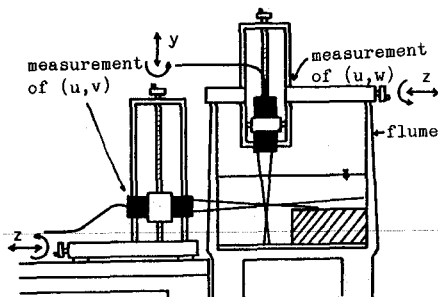


図2 FLDA計測システム

表1 実験条件表

CASE	Flow depth of main channel H (cm)	Height of flood plain D (cm)	Maximum velocity U_{max} (cm/s)	Friction velocity U_* (cm/s)	Mean bulk velocity U_b (cm/s)	Reynolds number $Re(x10^4)$ $(4U_b R/\nu)$	Froude number Fr (U_b/\sqrt{gh})
SC11	8.03	2.00	40.9	1.64	36.8	6.72	0.415
SC12	5.98	2.00	35.4	1.51	31.9	4.50	0.416
SC21	8.00	4.00	38.9	1.64	34.9	5.45	0.393
SC22	4.68	4.00	34.0	1.37	28.8	3.23	0.374
SC31	8.05	6.00	35.8	1.41	28.8	3.68	0.324
RC21	8.05	4.00	35.2	1.54	27.7	3.97	0.312

この複断面水路の断面図と座標形を図-1に示す。高水敷高さは、2 cm、4 cmおよび6 cmの3通りとし、表-1に示す6ケースの実験を行った。このうちケースRC21は、高水敷底面を粗面としたものである。ここで用いた粗度は、相当砂粒粗度0.7 mmのピラミッド型突起を持つ塩ビ製床マットである。

流速計測には、2カラー4ビームのファイバーレーザードップラー流速計 (FLDA) [日本KANOMAX社製]を用いた。光源は2 Wのアルゴン・イオンレーザーである。緑と青の4つのビームが長さ10 mの光ファイバーを通して光学プローブに導かれる。光学プローブは、直径45 mm、長さ200 mmで焦点距離は250 mmである。また、ビームの交差角は 6.6° である。このプローブは、流下方向 (x軸) と鉛直方向 (y軸) の流速成分 (u, v) の計測のときは水路の横に設置され、流下方向と横断方向 (z軸) の流速成分 (u, w) の計測のときは水面上に、図2のように設置された。水面変動が十分小さかったので水面からの計測も十分な精度で可能であった。ただし、水路底よりの反射光の影響で底面から1 cm以下のところは計測できなかった。光学プローブの水中焦点距離の制限のため、 $z \leq 30$ cmの範囲で計測が行われた。ビーム交差面と流下方向軸とのなす角 θ は 45° にセットされた。この角度の真の値よりの少しのずれは二次流が連続条件を満たすように、Nezu & Rodi⁹⁾と同様の方法で補正された。また、4ビームによる計測ではビームが底面または水面に遮られるため、水路底面及び水面近くが計測できない。このような領域では、2ビームのみを用いた1成分計測を行った。(u, w)計測ではまた、プローブ径が大きいため、側壁より3 cm以内が計測できなかった。信号処理器としてはトラッカーを用い、この出力信号はサンプリング周波数100 Hz、サンプリング時間50秒でA-D変換され種々の処理が行われた。

3. 実験結果とその考察

3.1 二次流 (縦渦) の構造

計測された二次流ベクトル図を図3に示す。流速値は最大流速 U_{max} で無次元化されている。VおよびWの値はほぼ連続式を満足しているが、底面近くのV、Wの計測ができなかったために、底面近傍の渦が閉じていないように見える。また、ケースSC31では高水敷上の水深が2 cmしかないために二次流ベクトルが描けなかった。すべてのケースにおいて接合部のエッジから強い斜め方向の上昇流が発生しているのが明確に認められる。 $\sqrt{V^2+W^2}$ で定義される、この斜め上昇流の流速の最大値はケースSC11、SC21、SC31について、 U_{max} のそれぞれ約3.5%、4%および2.5%であり、高水敷高さがちょうど低水路水深の1/2のときに二次流が最も発達する点が注目される。この値は長方形断面で発生する二次流の最大値 (U_{max} の約2%) と比べて大きい。またこの斜め上昇流の角度はD/Hの増加とともに 45° から 60° 程度へと変化する。この斜め上昇流をはさんで両側に一對の縦渦が形成されている。いま高水敷側の渦を高水敷渦、低水路側の渦を低水路渦と呼ぶことにする。この複断面特有の基本的な二次流の構造および強さは、以前に著者らによって行なわれた対称複断面水路におけるホットフィルム流速計による計測結果とほぼ一致する。このことからホットフィルムによる二次流計測の精度がかなり高いことが改めて確認される。D/Hが最も小さいケースSC11では低水路渦は非常に弱いが、高水敷渦は大きく発達して水面にまで達する。ケースSC21では、高水敷渦と低水路渦はほぼ同程度の強さと空間的大きさを持つようになる。D/Hの最も小さいケースSC31では高水敷渦は不明であるが、低

水路渦は横方向のスケールがさらに大きくなっている。本実験ではSC31の高水敷上の二次流が計測されなかったが、ホットフィルムによる計測結果では高水敷上の水深が小さい場合も同様の高水敷渦が認められた⁷⁾。

一方、低水路の側壁 ($z=0$) 付近には、長方形断面の開水路で認められたと同様の水面渦および底面渦が認められる。水面渦はアスペクト比 B/H が5以上のとき、水深の2倍程度まで発達することが、著者ら¹⁰⁾によって示されているが、本実験の場合、水面渦と低水路渦は低水路内で干渉しあうことになる。この水面渦と低水路渦がぶつかりあって下降流が生じる位置は D/H の増加とともに低水路側壁に近づく。また高水敷上を粗面としたケースRC21の二次流構造は高水敷上滑面のケースSC21とほとんど同様であるが、低水路中央付近での下降流がRC21の方が大きくなっている。図4はケースSC21についてVの横断分布とWの鉛直分布を示したものである。Vは接合部付近の比較的狭い範囲で大きな正の値をとり、その両側で相対的に小さな負の値をとっていることがわかる。また、Wは接合部付近の低水路側では $y/H > 0.5$ で負の値、 $y/H < 0.5$ で正の値を示し、底面および水面で絶対値が小さくなる傾向にある。一方高水敷上では底面側が負、水面側が正のほぼ直線的な分布を示している。

3. 2 平均主流速分布
図5に最大流速 U_{max} で無次元

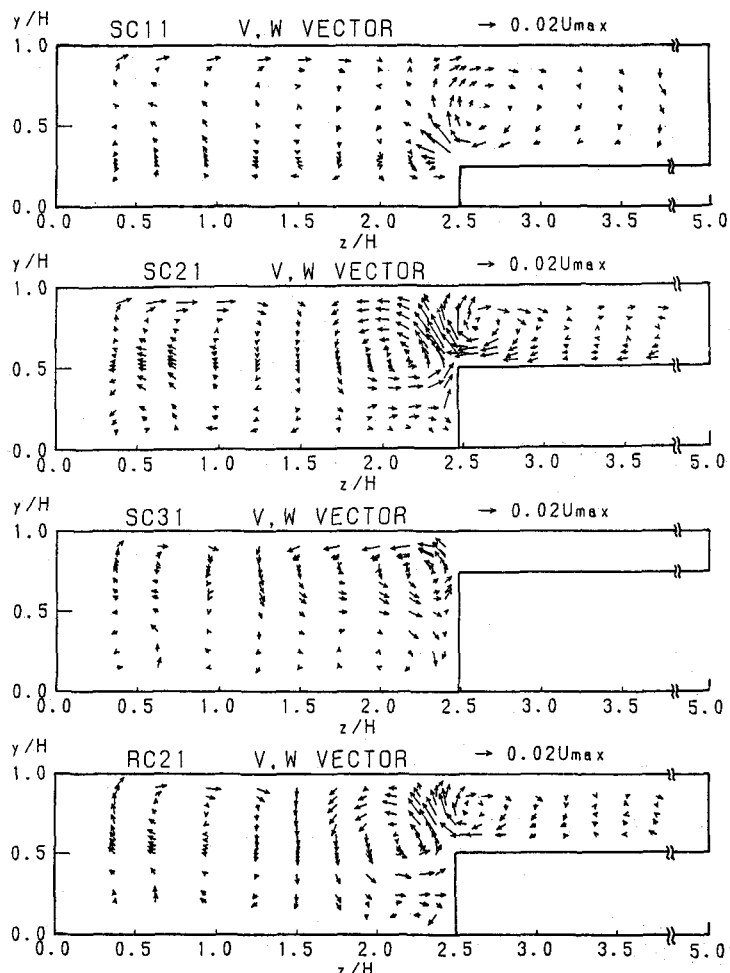


図3 二次流ベクトル図

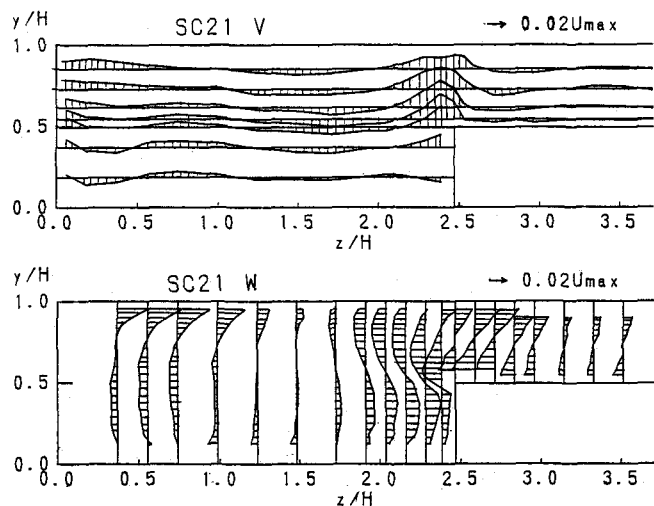


図4 二次流速V, Wの分布特性

化した平均主流速 U の等流速線を示す。 D/H が $1/2$ 以下のケースでは等流速線が接合部のエッジから水面に向かって突出した分布を示す。この突出は D/H の増加とともに斜め方向に傾き、より鋭くなる。この領域は図3で示した斜め上昇流に沿っており、壁からはなれる二次流による低運動量の輸送によって減速されたことを示している。この凸部の両側で等流速線は壁に向かって突出し、逆に壁に向かう二次流によって加速されていることを示している。しかし、 D/H が $1/2$ より大きいケースではこの等流速線の上方への突出はみられず、むしろ単一の長方形断面の場合と同様に水面近傍が減速された分布となる。低水路側壁($z=0$)付近は長方形断面の特徴である側壁に突出した等流速線形状を示す。最大流速点の降下現象は D/H の増加とともに著しくなり、徐々に幅の狭い長方形水路に近づくことを示している。一方、高水数粗面のRC21では高水数上の流速は滑面に比べて小さくなっているものの、低水路の分布はほぼ同様である。

3.3 底面せん断応力分布

平均主流速の低水路および高水数上の分布の片対数プロットの一例を図6に示す。図中の一点鎖線は、

$$U/U_x = (1/\kappa) \ln (U_x y / \nu) + A \quad (1)$$

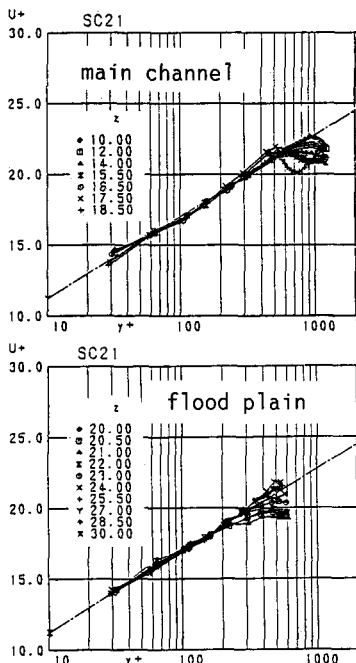


図6 主流速分布の対数則

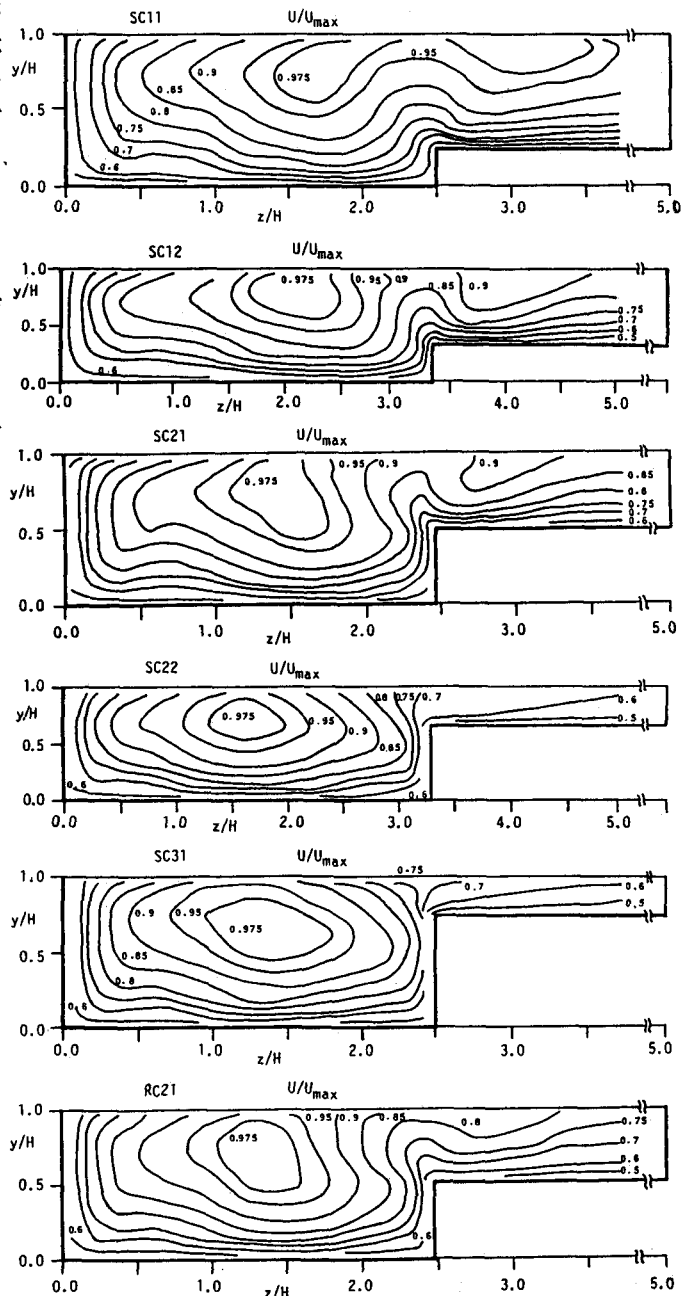


図5 平均主流速の等流速線

で表わされる対数則で、Nezu & Rodi⁹⁾ に従って $\kappa=0.41$ 、 $A=5.3$ を用いた。低水路および高水数上とも $y^+ \leq 200$ の範囲で対数則によく従っている。ここで $y^+ \leq 200$ で対数則に一致するように求められた摩擦速度 U_* から、壁面せん断応力が $\tau = \rho U_*^2$ として求められた。この壁面せん断応力の横断分布を図7に示す。 D/H の増加とともに高水数上の τ の値が低水路の値に比べて相対的に小さくなる。高水数上の τ は接合部が近づくにつれて急激に増大し、低水路からの運動量の輸送が大きいことがわかる。この高水数上のピーク値に対する高水数中央の値の比は D/H の増加とともに大きくなる。また、高水数粗面のケースRC21ではSC21に比べて高水数上の τ の値は当然大きくなるが、その分布形はSC21とほぼ同様であることがわかる。

3. 4 乱れ特性 図8に二次流が最も強く現われたケースSC21の乱れ強度 u' 、 v' および w' と乱れエネルギー $k=(u'^2+v'^2+w'^2)/2$ の等値線を示す。乱れ強度の3成分とも接合部エッジで増大しているが、注意深くみると等値線形状に若干の相違がみられる。 u' の等値線は接合部エッジから

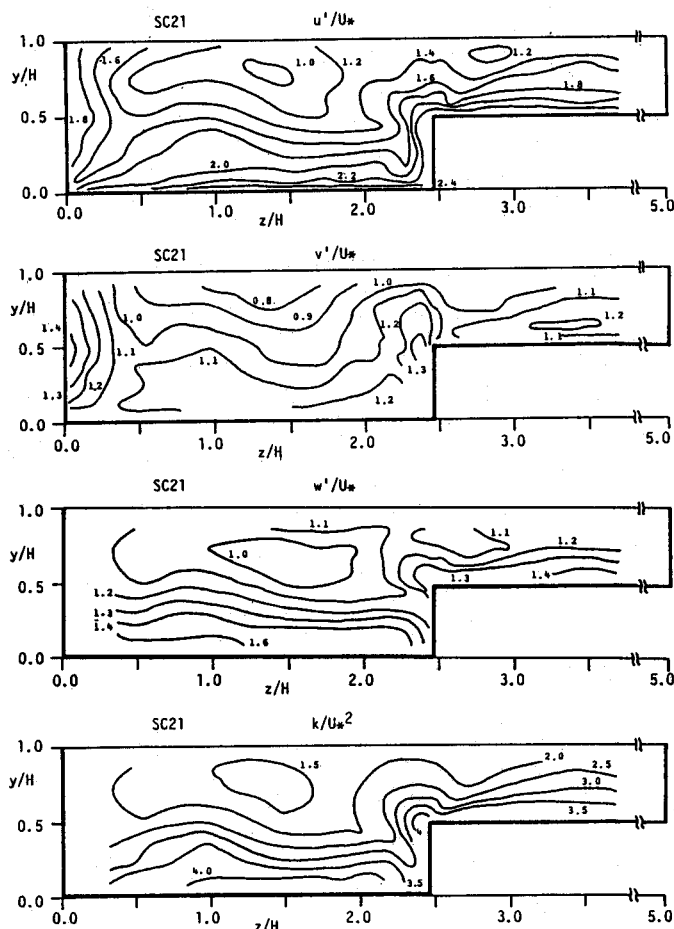


図8 乱れ強度および乱れエネルギーの等値線図

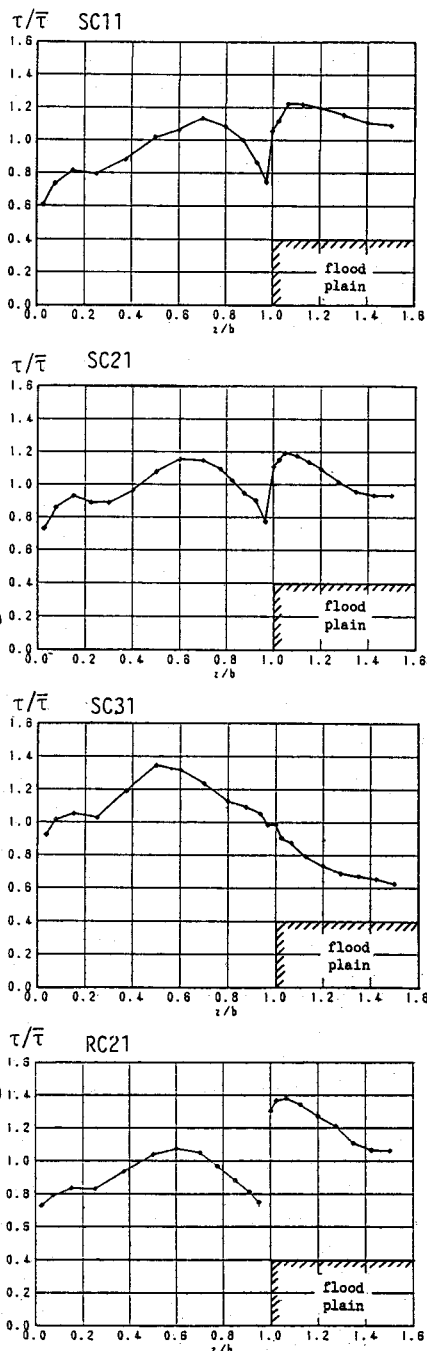


図7 底面せん断応力分布

上方および横方向に張り出し、中央部がくぼむ傾向にある。これに対し、 v' の等値線は上方に張り出し、 w' の等値線は横方向に張り出す傾向にあり、また w' の接合部での増加は他に比べて小さいようである。このことは接合部付近で乱れの非等方性が強くなることを示唆し、結果として接合部の二次流を発生させるものと考えられる。この特性は今後三次元の乱流の数値計算によって検討されるべきである。また u' 、 w' は最小値が水面より下に現われているが、 v' は水面に現われているのも注目される。乱れエネルギー k の等値線は接合部で同心円状に張り出しており平均主流速 U と同様の傾向を示している。

次に、図9はレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ の等値線である。 $-\overline{uv}$ の高水敷上の値は接合部手前でいったん減少し、接合部エッジの直上でピークをとる。ここから低水路に向かって急激に減少して負の値となる。この負の値の領域は、 $\partial U / \partial y$ が負となる領域と一致する。一方、 $-\overline{uw}$ は接合部エッジ付近で激しい変化を示し、高水敷側で正のピーク、低水路側で負のピークをとる。図10は二次流の発生を支配する垂直応力差 $(\overline{w^2} - \overline{v^2})$ の等値線である。低水路中央付近の鉛直方向の分布特性を見ると、 $y/H=0.6 \sim 0.7$ で最小値をとり水面に向かって再び増大する開水路特有の分布が明かである。接合部近くで $(\overline{w^2} - \overline{v^2})$ は負の領域が現われ、複雑な分布となっている。

4. あとがき

本研究では、複断面開水路の流れを高精度のファイバーレーザードップラー流速計 (FLDA) を用いて計測し、特に接合部近傍の特性に着目した。複断面接合部近傍の二次流構造は、強い斜め上昇流とこれに伴う高水敷渦および低水路渦からなる。この平均流速および乱れ特性量の詳細なデータは、今後複断面の三次元乱流構造、抵抗則、流砂輸送等を予測する数値モデルの開発および検証に利用していきたい。最後に、群馬大学学生、小林弘太郎、福田稔両氏に実験およびデータ整理に協力して頂いた。また本研究を遂行するに当たって昭和63年度文部省科学研究費・奨励研究 (A) の補助を受けた。記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- (1)Rajaratnam, N. and R.M.Ahmadi(1981), J.Hydraulic Research, vol.19, No.1, (2)Knight, D.W. and M.E. Hamed(1984), J.Hydraulic Eng., ASCE, vol.110, (3)Prinos, P. et al.(1985), J.Hydraulic Eng., ASCE, vol.111, (4)Keller, R.J. and W.Rodi(1988), J.Hydraulic Research, vol.26, No.4, (5)Kawahara, Y. and N.Tamai(1988), Proc. of 3rd Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, (6)Larsson, R.(1988), 同上, (7)Tominaga, A. and K.Ezaki(1988), Proc. of 6th Congress of APD IAHR, vol.2, (8)富永晃宏、江崎一博、中村悦由(1987)、第42回年譜、2、(9)Nezu, I. and W.Rodi(1986), J.Hydraulic Eng., ASCE, vol.112, (10)富永晃宏、江崎一博(1985)、土木学会論文集、第357号/2